

ارزیابی اتصال بندر چابهار به شبکه ریلی بر حجم ترانزیت کریدور

شمال-جنوب: رویکردی ترکیبی مبتنی بر پیش‌بینی سری زمانی،

شبکه عصبی و پویایی سیستم

مقاله علمی - پژوهشی

محمد ریگی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران
*نریمان نیکو (نویسنده مسئول)، استادیار، دانشکده مهندسی عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران
پگاه همدانی، استادیار، دانشکده مهندسی عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: n.nikoo@cet.ui.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۲۱ - پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۱۰

صفحه ۳۴-۱۷

چکیده

توسعه زیرساخت‌های ریلی در اقتصادهای نوظهور، اهرمی کلیدی برای ارتقای پایداری و کاهش هزینه‌های لجستیک در زنجیره تأمین محسوب می‌شود. بندر چابهار به دلیل موقعیت استراتژیک در دریای عمان و دسترسی به آب‌های آزاد، پتانسیل تبدیل شدن به هاب ترانزیتی در کریدور بین‌المللی شمال-جنوب را داراست؛ با این حال، تحقق این ظرفیت مستلزم اتصال پایدار به شبکه ریلی سراسری است. پژوهش حاضر با هدف تحلیل کمی و علی‌اثرات این اتصال، یک چارچوب متدولوژیک سه‌لایه شامل پیش‌بینی سری زمانی، مدل LSTM، مدل‌های اقتصادسنجی و مدل‌سازی پویایی سیستم ارائه می‌دهد. شبیه‌سازی مدل در بازه زمانی ۲۰۲۵ تا ۲۰۳۵ تحت سه سناریوی پایه، اتصال متوسط و اتصال تهاجمی انجام شده است. یافته‌ها نشان می‌دهد که در سناریوی بدون اتصال ریلی، حجم ترانزیت در سطح حداقلی (کمتر از ۰.۱ میلیون تن) باقی می‌ماند. در مقابل، با اجرای سناریوی اتصال تهاجمی، ظرفیت مسیر به بیش از ۱۰ میلیون تن در سال افزایش یافته و حجم ترانزیت محقق شده به حدود ۵ میلیون تن تا سال ۲۰۳۵ بالغ می‌شود. همچنین، شاخص هزینه تعمیم‌یافته در این سناریو تا ۹۰٪ کاهش می‌یابد که منجر به افزایش چشمگیر جذابیت مسیر برای صاحبان بار بین‌المللی می‌گردد. نتایج این تحقیق ابزاری تصمیم‌یار برای سیاست‌گذاران حوزه حمل‌ونقل جهت بهینه‌سازی سرمایه‌گذاری‌ها و ارتقای سهم ایران در ترانزیت منطقه‌ای فراهم می‌آورد.

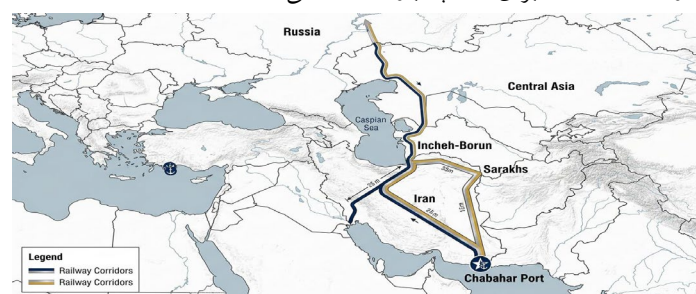
واژه‌های کلیدی: بندر چابهار، کریدور شمال-جنوب، حمل‌ونقل ریلی، پیش‌بینی تقاضا، ترانزیت کالا

۱- مقدمه

شکل‌دهی به نظم جدید تجاری در سطح منطقه‌ای و جهانی محسوب می‌شوند. در این میان، حمل‌ونقل ریلی در اقتصادهای نوظهور به عنوان اهرمی برای کاهش هزینه‌های عملیاتی، تقلیل زمان حمل، ارتقای پایداری زیست‌محیطی و افزایش تاب‌آوری زنجیره تأمین در برابر شوک‌های بین‌المللی جایگاهی منحصربه‌فرد یافته است. اهمیت این بخش به‌ویژه در شرایط نوسانات ژئوپلیتیکی و اختلالات زنجیره تأمین جهانی دوچندان شده و

در جهان امروز، توسعه زیرساخت‌های حمل‌ونقل و لجستیک فرامرزی، صرفاً یک پروژه عمرانی نیست، بلکه به عنوان یکی از اصلی‌ترین ارکان قدرت اقتصادی و دیپلماسی تجاری کشورها شناخته می‌شود. در چنین بستری، کشورها با هدف افزایش نفوذ اقتصادی و تثبیت جایگاه خود در زنجیره‌های ارزش جهانی، به توسعه کریدورهای چندوجهی حمل‌ونقل روی آورده‌اند. این کریدورها نه تنها مسیرهای جابه‌جایی کالا، بلکه ابزارهایی برای

ترانزیتی، تمرکز بر یک گلوگاه فیزیکی کافی نیست. بلکه باید متغیرهایی نظیر هزینه تعمیم یافته، زمان حمل، قابلیت اطمینان و هماهنگی نهادی به صورت هم‌زمان بهبود یابند. این عوامل در قالب یک سیستم به هم پیوسته عمل می‌کنند و هرگونه بهبود یا اختلال در یکی از آن‌ها می‌تواند اثرات زنجیره‌ای بر کل عملکرد کریدور داشته باشد. در سال‌های اخیر، اکثر مطالعات پیرامون کریدور شمال-جنوب عمدتاً بر جنبه‌های ژئواکونومیک یا سناریوهای کیفی متمرکز بوده‌اند و کمتر پژوهشی به صورت کمی و علی، تأثیر مستقیم اتصال ریلی چابهار بر حجم ترانزیت را با در نظر گرفتن پیچیدگی‌های سیستمی تحلیل کرده است. این عوامل در قالب یک سیستم به هم پیوسته عمل می‌کنند و هرگونه بهبود یا اختلال در یکی از آن‌ها می‌تواند اثرات زنجیره‌ای بر کل عملکرد کریدور داشته باشد. شکل ۱ نقشه شماتیک و اتصال چابهار به آسیای میانه و روسیه را نشان می‌دهد (Barlas, 1996). این نقشه شماتیک نمایانگر یک کریدور چندوجهی و استراتژیک است که از سواحل دریای عمان آغاز شده و با عبور از شبکه ریلی جنوب شرق ایران، به شریان‌های اصلی حمل‌ونقل کشور متصل می‌شود. در این ساختار، محور چابهار-زاهدان به عنوان ستون فقرات اولیه، نقش کلیدی در انتقال بار از بندر به داخل کشور ایفا می‌کند و در ادامه از طریق اتصال به خطوط بافق-مشهد یا محور کرمان-بافق، امکان دسترسی به شبکه ریلی سراسری فراهم می‌شود. این مسیر سپس به کریدور شمال-جنوب متصل شده و از طریق مرزهای سرخس و اینچه‌برون، به شبکه ریلی کشورهای آسیای میانه نظیر ترکمنستان، قزاقستان و در نهایت روسیه پیوند می‌خورد. در طراحی مهندسی این کریدور، پارامترهایی نظیر ظرفیت خطوط، شعاع قوس‌ها، شیب مسیر، ایستگاه‌های لجستیکی و پایانه‌های ترکیبی نقش تعیین‌کننده‌ای در بهره‌وری دارند. همچنین، ایجاد هاب‌های لجستیکی در نقاط میانی مانند زاهدان و مشهد، به عنوان مراکز تجمع و توزیع بار، موجب افزایش کارایی شبکه می‌شود. از منظر شماتیک، این کریدور به صورت یک شبکه خطی-گره‌ای قابل نمایش است که در آن بندر چابهار به عنوان گره مبدأ و مراکز مرزی شمالی به عنوان گره‌های خروجی عمل می‌کنند.



شکل ۱. یک نقشه شماتیک و مهندسی از اتصال چابهار به آسیای میانه و روسیه (UNCTAD, 2022)

کشورهایی که از شبکه‌های ریلی یکپارچه برخوردارند، عملکرد باثبات‌تری در تجارت خارجی از خود نشان داده‌اند. در این راستا، بسیاری از کشورها با سرمایه‌گذاری هدفمند در شبکه‌های حمل‌ونقل ریلی، تلاش کرده‌اند سهم خود را از تجارت جهانی افزایش داده و وابستگی به روش‌های پرهزینه و آلاینده حمل‌ونقل جاده‌ای را کاهش دهند. همچنین، یکپارچگی زیرساخت‌های حمل‌ونقل به عنوان پیش‌نیاز توسعه کریدورهای بین‌المللی، نقش تعیین‌کننده‌ای در تسهیل جریان کالا و کاهش زمان ترانزیت ایفا می‌کند. ایران، با بهره‌مندی از موقعیت ژئوپلیتیک منحصر به فرد، در مرکز ثقل پیوند میان شرق و غرب و شمال و جنوب قرار دارد و منطقه مکران، به ویژه بندر چابهار، نگین این موقعیت استراتژیک است (Sterman, 2002). بندر چابهار به دلیل دسترسی مستقیم به اقیانوس هند و آب‌های آزاد، مجاورت با بازارهای پرتقاضای جنوب و مرکز آسیا و قرارگیری در نقطه آغازین کریدور بین‌المللی شمال-جنوب (INSTC)، ظرفیت تبدیل شدن به یک گره (هاب) ترانزیتی جهانی را داراست. این ویژگی‌ها موجب شده است که چابهار به عنوان یک گزینه جایگزین و مکمل برای مسیرهای سنتی ترانزیت منطقه، به ویژه مسیرهای عبوری از تنگه هرمز و کانال سوئز، مورد توجه قرار گیرد. این بندر تنها بندر اقیانوسی ایران محسوب می‌شود که بدون وابستگی به تنگه هرمز، امکان دسترسی مستقیم به بازارهای جهانی را فراهم می‌کند و از این منظر دارای مزیت رقابتی قابل توجهی نسبت به سایر بنادر منطقه است. با این حال، شواهد نشان می‌دهد که صرف توسعه فیزیکی اسکله‌ها و بنادر بدون اتصال کارا و پایدار به شبکه ریلی سراسری، نمی‌تواند منجر به جهش ترانزیتی شود؛ چرا که بهره‌برداری اثربخش از این ظرفیت، در گروی ادغام آن با کریدورهای فرامرزی و ایجاد یک زنجیره لجستیک یکپارچه است. در واقع، نبود اتصال ریلی کارآمد، باعث افزایش هزینه‌های حمل‌ونقل چندوجهی، کاهش سرعت جابه‌جایی و افزایش عدم قطعیت در زمان تحویل کالا می‌شود که این امر مستقیماً بر تصمیم صاحبان بار برای انتخاب مسیر اثرگذار است (Kabir et al., 2025; Lane & Sterman, 2011). تجربه کشورهای پیشرو در مدیریت کریدورهای بین‌المللی حاکی از آن است که برای جذب بار

ارائه می‌شود. در نهایت، جمع‌بندی و پیشنهادهای سیاستی مطرح خواهد شد.

۲- پیشنهاد تحقیق

تحقیقات گسترده‌ای در سال‌های اخیر بر اهمیت استراتژیک بنادر و اتصال آن‌ها به شبکه‌های ریلی به عنوان محرک‌های اصلی توسعه اقتصادی و لجستیکی تمرکز یافته‌اند. در این بخش مقالات و مطالعات مرتبط در سه بخش مدل‌های تقاضا و سری زمانی، مدل‌های یادگیری عمیق، و مدل‌های پویایی سیستم مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت روند تحقیقات و شکاف پژوهشی جمع‌بندی گردیده است.

۲-۱- مدل‌های تقاضا و سری زمانی

صادقی گرگاری و همکاران (Sadeghi Gargari et al., 2022) با استفاده از مدل ARIMA برای پیش‌بینی بلندمدت ترافیک کانتینری بندر شهیدرجایی نشان دادند که مدل‌های سری زمانی از دقت مناسبی در پیش‌بینی تقاضای بندری برخوردار بوده و می‌توانند مبنای برنامه‌ریزی توسعه زیرساخت‌های حمل و نقل و بنادر قرارگیرند. در همین راستا، ونگ و همکاران (۲۰۲۰) در مطالعات خود اثبات کردند که اتصال ریلی مستقیم به پس‌کرانه، فراتر از یک تغییر زیرساختی، به عنوان محرک اصلی رقابت‌پذیری بندر در حال توسعه عمل می‌کند. همچنین، گزارش‌های معتبر بین‌المللی از جمله (UNCTAD, 2025) نشان می‌دهند که سرمایه‌گذاری‌های بین‌المللی در بندری نظیر چابهار، پیوندی ناگسستنی با ظرفیت‌های مسیر برای اتصال به بازارهای هدف در آسیای میانه و روسیه دارد. پناهی و همکاران (Panahi et al., 2017) با بررسی آینده تقاضای بندر کانتینری ایران نشان دادند که توسعه و جذب بار ترانزیتی در بندر چابهار علاوه بر ظرفیت‌های بندری، به میزان اتصال این بندر به شبکه‌های حمل‌ونقل و بازارهای منطقه‌ای وابسته است. نتایج این مطالعه بیانگر آن است که استفاده از مدل‌های سری زمانی و پیش‌بینی تقاضا می‌تواند ابزار مؤثری برای برنامه‌ریزی توسعه زیرساخت‌های بندری و تصمیم‌گیری راهبردی در کریدورهای ترانزیتی باشد. در ادامه، (Wang et al., 2020) و Giang (۲۰۲۵) استفاده از مدل تفاوت در تفاوت‌ها را برای تفکیک اثر خالص زیرساخت بر رشد اقتصادی و باربری بندر توصیه کرده‌اند. همچنین، مدل‌های سنتی اقتصادسنجی مانند رگرسیون

این مقاله، از مدل پویایی سیستم^۱ برای تحلیل ساختار کلان شبکه لجستیکی و ترسیم سناریوهای آینده بهره می‌گیرد. علاوه بر این، به منظور افزایش دقت پیش‌بینی و تحلیل روابط علی، از ترکیب مدل‌های شبکه عصبی و اقتصادسنجی نیز در کنار پویایی سیستم استفاده شده است. هدف آن است که ضمن ارائه بینشی نظری، به عنوان ابزاری تصمیم‌یار برای نهادهایی چون وزارت راه و شهرسازی، سازمان بنادر و شرکت راه‌آهن عمل کند. یافته‌ها نشان می‌دهد سرمایه‌گذاری در ظرفیت مسیر، با کاهش هزینه تعمیم‌یافته و افزایش جذابیت مسیر، حلقه تقویتی پدید می‌آورد که در نهایت به جذب بار بیشتر و توجیه سرمایه‌گذاری‌های آتی منجر می‌شود. در ادبیات موضوع، سه بخش اصلی قابل تشخیص است: نخست، ارزیابی پتانسیل‌های جغرافیایی و اقتصادی بندر چابهار با استفاده از روش‌های SWOT و AHP که نشان‌دهنده جایگاه بی‌بدیل این بندر به دلیل موقعیت فراتر از تنگه هرمز در بازتعریف مسیرهای تجاری است. این دسته از مطالعات بیشتر بر شناسایی مزیت‌های نسبی تمرکز داشته و کمتر وارد تحلیل دینامیک عملکرد سیستم شده‌اند. دوم، مدل‌سازی و پیش‌بینی جریان‌های ترافیکی و بار با بهره‌گیری از روش‌های سری زمانی نظیر ARIMA و یادگیری ماشین، که پیش‌بینی دقیق حجم بار ورودی را پیش‌شرط برنامه‌ریزی زیرساختی شبکه ریلی می‌داند. با این حال، این مطالعات عمدتاً فاقد تحلیل روابط علی میان متغیرهای زیرساختی و عملکردی هستند. سوم، رویکرد پویایی سیستم که بر نقش حلقه‌های بازخورد پیچیده میان متغیرهایی مانند ظرفیت خطوط، تقاضای ترانزیتی، سیاست‌های دولتی و نوسانات اقتصادی تأکید دارد و به تحلیل اثرات متقابل تغییر ظرفیت مسیر بر عملکرد کریدور شمال-جنوب می‌پردازد. ترکیب این سه جریان پژوهشی می‌تواند چارچوبی جامع برای تحلیل و سیاست‌گذاری در حوزه ترانزیت فراهم آورد. نوآوری این پژوهش در ارائه یک چارچوب یکپارچه سه‌لایه است که به صورت هم‌زمان از پیش‌بینی مبتنی بر شبکه عصبی، تحلیل علی اقتصادسنجی و شبیه‌سازی پویایی سیستم بهره می‌برد و امکان تحلیل دقیق‌تر و کاربردی‌تر اثرات اتصال ریلی بندر چابهار را فراهم می‌سازد. ساختار مقاله حاضر به این صورت است که در بخش بعدی، مروری بر ادبیات موضوع ارائه می‌شود. سپس در بخش روش‌شناسی، چارچوب تحلیلی شامل مدل‌های LSTM^۲، اقتصادسنجی و پویایی سیستم تشریح می‌گردد. در ادامه، سناریوهای مورد بررسی معرفی شده و نتایج شبیه‌سازی

پنل یا تفاوت در تفاوت‌ها، اگرچه اثرات علی را به خوبی نشان می‌دهند، اما فاقد نگاه آینده‌نگر و سناریومحور برای سیاست‌گذاری‌های کلان هستند (Alavi-Borazjani et al., 2025; Hanaoka & Regmi, 2011). در ادامه جدول ۱ نشان دهنده مطالعات در این راستا می باشد.

جدول ۱. مطالعات مربوط به ARIMA

نویسندگان	روش	حوزه کاربرد	مهم ترین یافته
(Sadeghi Gargari et al., 2022)	SARIMA و شبکه عصبی	بندر شهیدرجایی	بهبود پیش بینی تقاضای بندری
(Wang et al. 2020)	تحلیل زیرساخت	بندر در حال توسعه	اتصال ریلی عامل رقابت پذیری
(UNCTAD, 2025)	گزارش تحلیلی	سرمایه گذاری بندری	وابستگی به اتصال بازارها
(Panahi et al., 2017)	مدل های سری زمانی	پیش بینی تقای بنادر ایران	وابستگی توسعه چابهار به اتصال شبکه حمل و نقل
(Wang et al., 2021)	DiD	اقتصاد بندری	اثر علی زیرساخت
(Giang, 2025)	DiD	حمل و نقل	تفکیک اثر سیاست
(Alavi-Borazjani et al., 2025)	اقتصاد سنجی	زیرساخت	محدودیت در سناریو
(Hanaoka & Regmi, 2011)	تحلیل حمل و نقل	آسیا	ضعف در آینده نگری

۲-۲- مدل های یادگیری عمیق

جهانی تأیید شده است؛ جایی که آن‌ها استفاده از لایه‌های عصبی پیشرفته را برای مدیریت وابستگی‌های زمانی طولانی در داده‌های لجستیکی ضروری می‌دانند. این مطالعات مبنای فنی انتخاب معماری شبکه عصبی در پژوهش حاضر، با تأکید بر پایداری مدل از طریق نرخ Dropout استاندارد برگرفته از Srivastava (۲۰۱۴)، قرار گرفته است. در واقع، اکثر مدل‌های پیش‌بینی تقاضا در حوزه بنادر و ریل، بر روش‌های کلاسیک سری زمانی مانند ARIMA یا مدل‌های یادگیری ماشین مانند LSTM تکیه دارند. اگرچه این روش‌ها در پیش‌بینی روندها دقیق هستند، اما معمولاً از تحلیل برهم‌کنش متغیرها و حلقه‌های بازخوردی ناتوانند. در ادامه مطالعات مربوط به LSTM در جدول ۲ ذکر شده‌اند.

با توجه به پیچیدگی و نوسانات داده‌های ترانزیتی، رویکردهای نوین پیش‌بینی از مدل‌های کلاسیک به سمت هوش مصنوعی تغییر جهت داده‌اند. شانکارو همکاران (Shankar et al., 2020) با مقایسه مدل‌های یادگیری عمیق و روش‌های کلاسیک سری زمانی نشان دادند که LSTM به دلیل توانایی در یادگیری روابط غیرخطی و وابستگی‌های بلندمدت داده‌ها، نسبت به مدل ARIMA دقت بیشتری در پیش‌بینی ترافیک کانتینری بنادر دارد و می‌تواند ابزار مؤثرتری برای برنامه‌ریزی و مدیریت عملیات بندری باشد. این یافته توسط (Bastanifar et al., 2024) و (Nadeem, 2024) نیز در تحلیل بنادر کانتینری ایران و بازارهای

جدول ۲. مطالعات مربوط به مطالعات LSTM

نویسندگان	سال	حوزه کاربرد	روش	مهم ترین یافته ها
(Shankar et al., 2020)	۲۰۲۰	پیش بینی ترافیک کانتینری بندر	LSTM vs ARIMA	دقت بالاتر LSTM
(Bastanifar et al., 2024)	۲۰۲۴	بنادر ایران	یادگیری عمیق	اهمیت وابستگی جهانی
(Nadeem, 2024)	۲۰۲۴	بازار جهانی	AI	بهبود پیش بینی

۲-۳- مدل های پویایی سیستم

مدل پویایی سیستم به دلیل قابلیت مدل سازی روابط علی، حلقه های بازخورد و تحلیل سناریوهای مختلف، یکی از رویکردهای مؤثر در بررسی مسائل پیچیده حمل و نقل و مدیریت بنادر به شمار می رود. جدول ۳ مروری بر مهم ترین مطالعات مرتبط با به کارگیری مدل پویایی سیستم در حوزه های مختلف حمل و نقل و زیرساخت ارائه می دهد. بررسی مطالعات نشان می دهد که مدل پویایی سیستم به دلیل توانایی در شبیه سازی روابط پیچیده، بازخوردها و تغییرات زمانی، به طور گسترده در تحلیل مسائل راهبردی مورد استفاده قرار گرفته است. در مطالعه لین و همکاران (2022)، مدل پویایی سیستم برای تحلیل مسائل مدیریت بنادر به کار گرفته شده و نتایج نشان می دهد که این رویکرد قادر است تعامل میان عوامل مختلف عملیاتی و مدیریتی را به خوبی تبیین کند. همچنین، (Lättilä (2008 با استفاده از مدل پویایی سیستم در بنادر فنلاند، اهمیت تحلیل سناریوهای

مختلف را برای ارزیابی سیاست های توسعه بندری و تصمیم گیری بلندمدت نشان داده است. در مجموع، مطالعات پیشین نشان می دهند که مدل پویایی سیستم به دلیل قابلیت تحلیل روابط علت و معلولی، شبیه سازی بازخوردها و ارزیابی سناریوهای مختلف، یکی از مناسب ترین رویکردها برای مطالعه سیستم های پیچیده به ویژه در حوزه مدیریت بنادر، حمل و نقل و زیرساخت محسوب می شود. همچنین، وجود محدودیت در روش های سنتی مانند اقتصادسنجی، ضرورت استفاده از رویکردهای پویا را بیش از پیش آشکار می سازد. این رویکرد امکان ارزیابی پیامدهای بلندمدت سیاست های مختلف و شبیه سازی رفتار سیستم را فراهم کرده و در مطالعات مدیریت بنادر نیز کارایی آن مورد تأیید قرار گرفته است (Lin et al., 2022).

جدول ۳. مطالعات مربوط به مدل پویایی سیستم

نویسندگان	حوزه کاربرد	مهم ترین یافته ها
(Lin et al., 2022)	مدیریت بنادر	تحلیل
(Lättilä, 2008)	بنادر فنلاند	تحلیل سناریو
(Shepherd, 2014)	مروری	تحلیل اثرات سیاست ها بر پویایی تقاضا و تغییرات زیرساختی حمل و نقل
(Yao et al., 2014)	کریدور	تحلیل تعادل دوسویه بین عرضه و تقاضای حمل و نقل در کریدورهای منطقه ای

۲-۴- شکاف تحقیقات

مرور مطالعات پیشین نشان می دهد که هر یک از رویکردهای به کاررفته در تحلیل توسعه کریدورهای ترانزیتی، تنها بخشی از ابعاد این مسئله پیچیده را پوشش می دهند. مدل های اقتصادسنجی و مبتنی بر تقاضا، در تبیین روابط علی و ارزیابی اثرات زیرساختی از دقت مناسبی برخوردارند، اما در تحلیل رفتارهای پویا، بازخوردهای سیستمی و ارزیابی سناریوهای بلندمدت با محدودیت مواجه اند. در مقابل، مدل های یادگیری عمیق، به ویژه LSTM، توانایی بالایی در پیش بینی روندهای زمانی و افزایش دقت پیش بینی تقاضا دارند، ولی قادر به تبیین سازوکارهای علی و تعاملات ساختاری میان متغیرها نیستند. از سوی دیگر، رویکرد پویایی سیستم (SD) با تمرکز بر روابط غیرخطی، حلقه های بازخوردی و رفتار بلندمدت سیستم، بستری مناسب برای تحلیل سیاست ها و سناریوهای آینده فراهم می کند، اما کارایی آن به

کیفیت و دقت داده های ورودی وابسته است. از این رو، تلفیق مدل های پیش بینی با رویکرد پویایی سیستم می تواند ظرفیت تحلیل و سیاست گذاری را به طور چشمگیری افزایش دهد. در حوزه مدیریت زنجیره تأمین و لجستیک بین المللی، اتصال بنادر به شبکه ریلی به عنوان یکی از مهم ترین عوامل ارتقای کارایی حمل و نقل، کاهش هزینه های لجستیک و کوتاه شدن زمان ترانزیت شناخته می شود. مطالعات مرتبط با کریدور بین المللی شمال-جنوب نیز بر نقش راهبردی بنادر ساحلی، به ویژه بندر چابهار، در بازآرایی جریان های تجاری میان اقیانوس هند، آسیای مرکزی و دریای خزر تأکید کرده اند. با وجود این، بخش عمده پژوهش های انجام شده، اثرات توسعه زیرساخت های ریلی را به صورت بخشی و با استفاده از یک رویکرد تحلیلی منفرد بررسی کرده اند. بررسی نظام مند ادبیات نشان می دهد که گسست روش شناختی قابل توجهی در این حوزه وجود دارد.

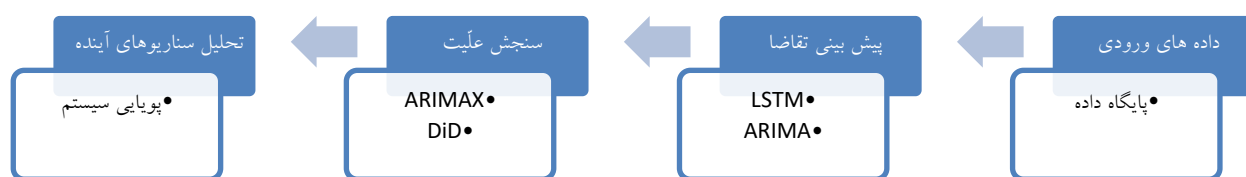
نوآوری پژوهش حاضر در ارائه یک چارچوب تحلیلی یکپارچه برای ارزیابی اثرات اتصال ریلی بندر چابهار بر عملکرد ترانزیتی کریدور بین‌المللی شمال-جنوب است. این چارچوب امکان تحلیل سیاستی در سناریوهای مختلف توسعه (پایه، میانی و تهاجمی) را فراهم کرده و علاوه بر پیش‌بینی روندهای آتی، پیامدهای بلندمدت گزینه‌های مختلف سیاستی را نیز شبیه‌سازی می‌کند. بدین ترتیب، پژوهش حاضر ضمن ارتقای سطح تحلیل از پیش‌بینی صرف به تبیین علّی و سیاست‌گذاری مبتنی بر شبیه‌سازی، می‌تواند مبنایی علمی برای تصمیم‌گیری‌های راهبردی در توسعه زیرساخت‌های حمل‌ونقل و ترانزیت کشور فراهم آورد.

۳- روش‌شناسی تحقیق

تحقق اهداف این پژوهش مستلزم به‌کارگیری یک رویکرد چندبعدی است که بتواند هم رفتارهای خطی و غیرخطی داده‌های تاریخی را تحلیل کند و هم اثرات سیاست‌های زیرساختی جدید (اتصال ریلی) را در قالب یک سیستم شبیه‌سازی نماید. بر این اساس، متدولوژی این تحقیق در چهار گام متوالی طراحی شده است (شکل ۲). نخست، استفاده از الگوریتم‌های یادگیری عمیق و سری زمانی برای پیش‌بینی تقاضا، دوم، به‌کارگیری مدل‌های اقتصادسنجی برای سنجش علّیت، در نهایت مرحله سوم، تدوین مدل پویایی سیستم برای تحلیل سناریوهای آینده. در ادامه، جزئیات فنی هر یک از این بخش‌ها تشریح می‌گردد.

اغلب پژوهش‌ها یا بر پیش‌بینی تقاضا با استفاده از مدل‌های سری زمانی و یادگیری ماشین متمرکز بوده‌اند، یا اثرات زیرساختی را از طریق روش‌های اقتصادسنجی تحلیل کرده‌اند و یا صرفاً از منظر پویایی سیستم به تحلیل رفتارهای کلان پرداخته‌اند. در نتیجه، کمتر پژوهشی چارچوبی یکپارچه ارائه کرده است که بتواند هم‌زمان دقت پیش‌بینی، تبیین علّی و تحلیل سناریوهای آینده را در کنار یکدیگر فراهم آورد. همچنین، در مطالعات مربوط به بندر چابهار و کریدور شمال-جنوب، استفاده از مدل‌های ترکیبی مبتنی بر داده‌های واقعی برای ارزیابی پیامدهای بلندمدت سیاست‌های توسعه زیرساختی، به‌ویژه اتصال ریلی، همچنان محدود است.

بر همین اساس، شکاف اصلی پژوهش حاضر، فقدان یک چارچوب تحلیلی جامع برای تلفیق سه سطح مکمل تحلیل شامل «پیش‌بینی دقیق تقاضا»، «تبیین علّی اثرات زیرساختی» و «شبیه‌سازی پویای سناریوهای آینده» است. این پژوهش با بهره‌گیری از یک چارچوب سه‌لایه، متشکل از مدل‌های پیش‌بینی سری زمانی و یادگیری عمیق ((ARIMA, LSTM)، مدل‌های اقتصادسنجی علّی (ARIMAX, DiD) و رویکرد پویایی سیستم، این خلأ روش‌شناختی را برطرف می‌کند. در این چارچوب، خروجی مدل‌های پیش‌بینی به‌عنوان ورودی مدل پویایی سیستم به‌کار گرفته می‌شود و اثرات علّی سیاست‌های زیرساختی نیز به‌صورت کمی در فرآیند شبیه‌سازی لحاظ می‌شود.



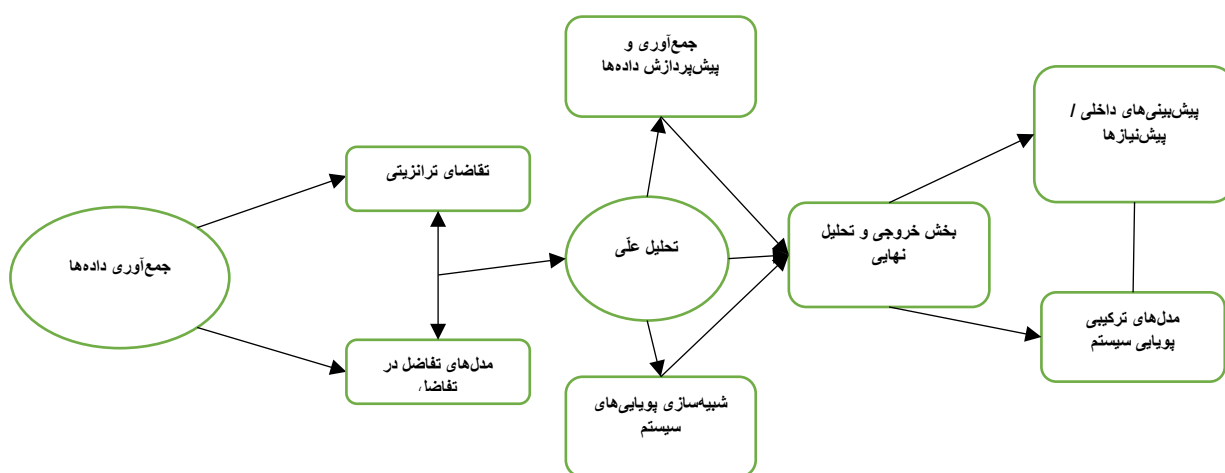
شکل ۲. روش‌شناسی پژوهش

نرمال‌سازی، به عنوان ورودی‌های دقیق و استاندارد جهت تضمین پایداری مدل‌های پیش‌بینی آماده‌سازی شده‌اند. در گام دوم، تمرکز پژوهش بر پیش‌بینی تقاضا و تحلیل علّی معطوف است. در این مرحله با اتخاذ یک رویکرد ترکیبی، از توانمندی شبکه‌های عصبی LSTM برای پیش‌بینی دقیق نوسانات آتی تقاضا استفاده شده و هم‌زمان، متدولوژی تفاضل در تفاضل به کار گرفته شده است. این رویکرد به پژوهشگر اجازه می‌دهد تا

روندنمای تحقیق حاضر در شکل ۳، یک چارچوب نظام‌مند و سه‌مرحله‌ای را برای تحلیل اثرات راهبردی اتصال ریلی بر توان ترانزیتی کریدور شمال-جنوب ترسیم می‌کند. در مرحله نخست که به جمع‌آوری و پیش‌پردازش داده‌ها اختصاص یافته است، مجموعه‌ای جامع از داده‌های تاریخی ترانزیت، شاخص‌های کلان اقتصادی و پارامترهای فنی مرتبط با زیرساخت‌های ریلی بندر چابهار گردآوری شد. این داده‌ها پس از طی فرآیند

رفتار بلندمدت سیستم در افق ۲۰۳۵ تحت سه سناریوی محتمل پایه، متوسط و تهاجمی مورد ارزیابی قرار گرفته است. دستاورد نهایی مطابق روندنمای شکل ۴ این فرآیند یکپارچه، استخراج راهبردهای عملیاتی و پیشنهادهای سیاستی است که می‌تواند به‌عنوان نقشه راهی برای مدیران ارشد و تصمیم‌گیران حوزه ترانزیت و صنعت ریلی در جهت بهینه‌سازی بهره‌وری ملی مورد استفاده قرار گیرد.

اثر خالص و علیّ مداخله زیرساختی، یعنی اتصال به شبکه ریلی را از سایر متغیرهای محیطی و پارازیت‌های آماری تفکیک کرده و وزن واقعی این تغییر را بسنجد. در نهایت، در مرحله سوم، خروجی‌های حاصل از پیش‌بینی‌ها و تحلیل‌های علیّ در ساختار شبیه‌سازی پویایی سیستم ادغام گردیده‌اند. در این بخش، با مدل‌سازی حلقه‌های بازخوردی میان متغیرهای کلیدی نظیر ظرفیت مسیر، هزینه تعمیر یافته و شاخص جذابیت کریدور،



شکل ۳. روند نمای تحلیل اثر اتصال ریلی بر ترانزیت کریدور شمال - جنوب

۳-۱- داده‌های ورودی: منابع داده و فرآیند جمع‌آوری

پایه و اساس این مطالعه بر دو دسته داده اصلی استوار است که بازه زمانی ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۴ را پوشش می‌دهند. در بخش نخست، داده‌های تاریخی ترانزیت مورد بررسی قرار گرفته‌اند که مواردی نظیر حجم کالاهای جابجا شده در مسیرهای جاده‌ای فعلی کریدور شمال-جنوب، ظرفیت عملیاتی بندر چابهار در فازهای مختلف توسعه و همچنین آمارهای رسمی تردد کالا از بندار رقیب در منطقه را شامل می‌شوند.

در بخش دوم، داده‌های زیرساختی و هزینه‌ای به عنوان ستون دیگر این پژوهش لحاظ شده‌اند که پارامترهای فنی خط ریلی در دست احداث چابهار-زاهدان، سرعت بازرگانی پیش‌بینی شده، هزینه‌های تعرفه‌ای حمل‌ونقل ریلی در مقایسه با بخش جاده‌ای و شاخص‌های زمان‌سنجی تخلیه و بارگیری را در بر می‌گیرند. شایان ذکر است که تمامی این داده‌ها پیش از ورود به مدل، تحت فرآیند پیش‌پردازش دقیق از جمله نرمال‌سازی و حذف داده‌های پرت قرار گرفته‌اند تا از این طریق پایداری آموزش مدل‌های عصبی به طور کامل تضمین شود.

ساختار داده‌ای این پژوهش بر چهار منبع کلیدی و معتبر استوار است که اطلاعات لازم را جهت آموزش مدل LSTM و تنظیم دقیق پارامترهای پویایی سیستم در بازه زمانی ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۴ فراهم آورده‌اند. نخستین منبع، داده‌های عملیاتی سازمان بندار و دریانوردی ایران (PMO) است که آمار دقیق تخلیه و بارگیری بندر چابهار و پیشینه تاریخی ترانزیت را شامل می‌شود. در کنار آن، داده‌های فنی و لجستیکی شرکت راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران (RAI) از جمله ظرفیت خطوط، سرعت بازرگانی و ساختار تعرفه‌های حمل‌ونقل ریلی در کریدورهای شمالی، برای مدل‌سازی دقیق زیرساختی به کار گرفته شده است. در سطح بین‌المللی نیز برای تطبیق مدل با استانداردهای جهانی، از پایگاه‌های داده (UNCTAD) و بانک جهانی جهت استخراج شاخص‌های عملکرد لجستیک (LPI) و تحلیل هزینه‌های کانینتری در مسیرهای رقابتی همچون کانال سوئز استفاده گردید. همچنین، گزارش‌های تخصصی دبیرخانه کریدور INSTC (مستقر در هند و روسیه) نقشی محوری در تخمین

۳-۳-۳- سنجش علیت

۳-۳-۱- مدل حافظه طولانی کوتاه مدت

با توجه به ماهیت غیرخطی و نوسانی ترانزیت بین‌المللی، از شبکه عصبی LSTM که نوعی شبکه عصبی بازگشتی^۲ پیشرفته است استفاده شد. ساختار بهینه طراحی شده برای این پژوهش شامل موارد زیر است (Hochreiter & Schmidhuber, 1997). تصور کنید داده‌های ترانزیتی بندر چابهار یک جریان است. سلول LSTM مانند یک فیلتر هوشمند عمل می‌کند. در ادامه هر کدام از بخش‌های شبکه عصبی بازگشتی یا حافظه طولانی کوتاه مدت به تفصیل شرح داده می‌شوند. اولین بخش از LSTM وضعیت سلول یا Cell State است این بخش حکم حافظه بلندمدت را دارد. اطلاعات حیاتی (مثلاً اینکه چابهار در فلان سال به هند متصل شد) را از ابتدای سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۴ با خود حمل می‌کند بدون اینکه در طول مسیر ضعیف شوند.

در بخش پایش اطلاعات یا دروازه فراموشی یا Forget Gate تصمیم می‌گیرد چه اطلاعاتی دیگر مهم نیستند. مثلاً نوسانات مقطعی ناشی از یک طوفان در سال ۲۰۱۵ که دیگر بر روند آینده اثری ندارد، توسط این دروازه پاک می‌شود. جهت انتخاب بهترین و ارزنده‌ترین اطلاعات از دروازه ورودی استفاده می‌شود. این دروازه تصمیم می‌گیرد چه اطلاعات جدیدی (مثلاً افتتاح خط ریلی جدید در سال جاری) به حافظه بلندمدت اضافه شود. در نهایت در دروازه خروجی بر اساس حافظه جمع شده، پیش‌بینی می‌کند که در ماه آینده چند تن بار جابجا خواهد شد. جدول ۴ تنظیمات فنی مدل‌های پیش‌بینی را نشان داده است. در این جدول مدل، پارامترهای کلیدی، مقدار و علت انتخاب نیز اشاره شده است.

جدول ۴. تنظیمات فنی مدل‌های پیش‌بینی

مدل	پارامترهای کلیدی	مقدار / تنظیمات	علت انتخاب
LSTM	تعداد لایه‌ها و نرون‌ها	[64, 32, 1]	تعادل بین قدرت یادگیری و جلوگیری از پیچیدگی زیاد
پنجره زمانی	۱۲ ماهه	۱۲	بررسی اثرات فصلی ترانزیت در طول یک سال
تابع بهینه‌ساز	Adam	۰,۳	سرعت همگرایی بالا در داده‌های سری زمانی
ARIMA	مرتبه مدل (p, d, q)	(2, 1, 2)	استخراج شده از نمودارهای ACF و PACF برای ایستایی داده‌ها
بازه داده‌ها	۲۰۱۰ تا ۲۰۲۴	-	پوشش دوره‌های تحریم و رونق اقتصادی برای آموزش مدل

حجم تقاضای نهفته در بازارهای استراتژیک روسیه، هند و کشورهای مشترک‌المنافع (CIS) ایفا کرده است. شایان ذکر است که کلیه داده‌های خام پس از گردآوری، تحت فرآیند پاک‌سازی قرار گرفته و با بهره‌گیری از متد درونیابی (Interpolation) جهت جبران داده‌های مفقود در دوران پاندمی کرونا، استانداردسازی شده‌اند تا از پایداری و پایایی تحلیل‌های نهایی اطمینان حاصل شد.

۳-۲- مدل‌سازی پیش‌بینی تقاضا با رویکرد LSTM و

ARIMA

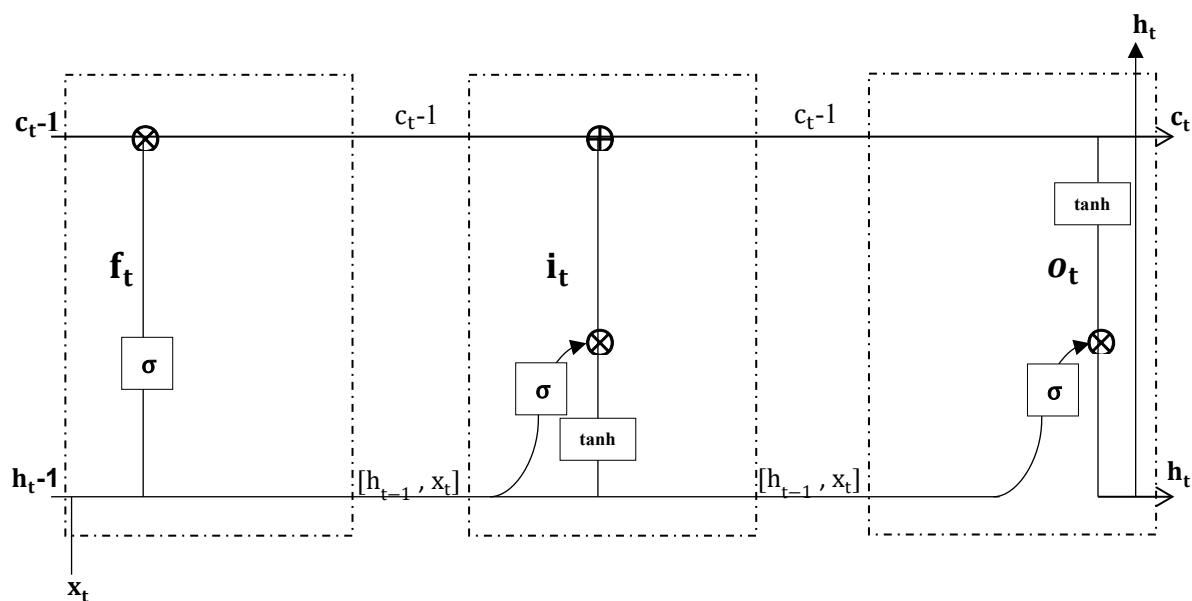
دلیل استفاده از مباحث هوش مصنوعی نسبت به روش‌های کلاسیک این است که در روش‌های آماری کلاسیک (مثل رگرسیون ساده) فرض می‌کنند که رابطه بین توسعه ریلی و جذب بار یک رابطه خطی و مستقیم است. اما در دنیای واقعی روابط تحت تاثیر شرایط مختلفی هستند. متغیرهایی مثل تحریم، نوسانات نرخ ارز و رقابت منطقه‌ای، تأثیری غیرخطی بر ترانزیت دارند که مدل‌های آماری از درک آن عاجزند. این مورد پیچیدگی و غیرخطی بودن نام دارد. مورد دوم وابستگی زمانی طولانی است. در واقع، اثر یک پروژه ریلی ممکن است با ۲ سال تأخیر خود را نشان دهد. یادگیری عمیق (به‌ویژه LSTM) قادر است این وقفه زمانی را یاد بگیرد. بحث بعدی دقت بالا در داده‌های حجیم می‌باشد. مطالعات مقایسه‌ای نشان داده‌اند که مدل‌های LSTM در داده‌های دارای نوسان بالا دقت بالاتری نسبت به مدل‌های سنتی دارند (Shankar et al., 2020). در این مرحله، هدف نگاشت الگوهای پنهان در داده‌های ترانزیتی بندر چابهار و کریدور شمال-جنوب طی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۴ است. برای دستیابی به بالاترین دقت، دو مدل با ماهیت متفاوت طراحی و مقایسه شده‌اند.

عصبی بازگشتی کلاسیک، LSTM از ساختار پیچیده‌ای برای مدیریت جریان اطلاعات بهره می‌برد. وضعیت سلول خط افقی در بالای تصویر، "نوار نقاله" اطلاعات است که اجازه می‌دهد داده‌های مهم ترانزیتی از سال‌های گذشته بدون تغییر به مراحل بعد منتقل شوند، دروازه فراموشی این بخش تصمیم می‌گیرد کدام اطلاعات قدیمی (مثلاً نوسانات مقطعی ترانزیت در ده سال پیش) دیگر برای پیش‌بینی آینده مفید نیستند و باید حذف شوند، دروازه ورودی این لایه تعیین می‌کند چه مقدار از اطلاعات جدید (مانند تغییرات اخیر در ظرفیت مسیر) در حافظه سلول ذخیره شود و در نهایت دروازه خروجی این دروازه مشخص می‌کند که کدام بخش از وضعیت سلول باید به عنوان خروجی (پیش‌بینی حجم بار) به مرحله بعد فرستاده شود.

استفاده از این ساختار باعث شده است که مدل ما به دقت ۹۲ درصدی دست یابد، زیرا توانسته است وابستگی‌های زمانی بین توسعه زیرساخت و جذب بار را که ممکن است چندین سال به طول بینجامد، به خوبی مدل‌سازی کند. ساختار این مدل یادگیری عمیق در شکل ۲ نشان داده شده است.

معماری شبکه شامل دو لایه مخفی LSTM با ۶۴ و ۳۲ نورون به همراه یک لایه متراکم (Dense) خروجی، توابع فعال‌سازی با استفاده از تابع $\tanh$ برای لایه‌های LSTM و relu برای لایه Dense جهت پایداری گرادیان، کنترل بیش‌برازش با اعمال لایه Dropout با نرخ ۰,۲ و استفاده از استراتژی Early Stopping (توقف زودهنگام) پس از ۱۵ دوره بدون بهبود (Goodfellow et al., 2016; Zhang, 2003)، بهینه‌ساز الگوریتم Adam با نرخ یادگیری ۰,۰۰۱ و تابع خطای MSE، تقسیم داده ۸۰٪ داده‌ها برای آموزش و ۲۰٪ برای آزمون و اعتبارسنجی مدل و مدل ARIMA به عنوان بنچ‌مارک کلاسیک، مدل اتورگرسیون میانگین متحرک انباشته برای تحلیل بخش‌های خطی و ایستای سری زمانی پیاده‌سازی شد تا مبنایی برای مقایسه دقت مدل هوشمند فراهم آید (Bastanifar et al., 2024; Nadeem, 2024).

شکل ۴ معماری داخلی یک سلول LSTM (حافظه طولانی‌مدت کوتاه) را نشان می‌دهد که در این پژوهش برای پیش‌بینی حجم ترانزیت استفاده شده است. برخلاف شبکه‌های



شکل ۴. تحلیل ساختار سلول LSTM

بهینه‌سازی خروجی نهایی تنظیم شده‌اند. در لایه‌بندی این شبکه، از ساختاری شامل دو لایه مخفی LSTM استفاده شده است که لایه نخست با ۶۴ نورون و لایه دوم با ۳۲ نورون وظیفه پردازش الگوها را بر عهده دارند و در نهایت یک لایه متراکم خروجی جهت تولید مقادیر نهایی در نظر گرفته شده است. جهت تحلیل

مدل ARIMA به عنوان خط‌کشی برای سنجش رفتارهای خطی عمل می‌کند، در حالی که LSTM با حافظه بلندمدت خود، شوک‌های ناگهانی (مثل افتتاح فاز اول توسعه) را در حافظه سلولی خود نگه می‌دارد تا پیش‌بینی دقیق‌تری ارائه دهد. پارامترهای عملیاتی در طراحی مدل شبکه عصبی حاضر با هدف

اثر اتصال ریل تایید می‌شود. شکل ۳ نشان دهنده تحلیل علی و ساختار درختی پژوهش است. عملکرد بنادر رقیب در منطقه که شرایط مشابهی دارند اما تغییر زیرساختی ریلی نداشته‌اند. این مدل به ما اجازه می‌دهد تا اثر شوک زیرساختی را از سایر عوامل محیطی و اقتصادی تفکیک کنیم و ضریب اثر خالص ریل بر جذب بار را استخراج نماییم. برای اعتبارسنجی خروجی‌های مدل و اطمینان از صحت تأثیر اتصال ریلی مستقیم بر جذب بار، بندر شهید رجایی (بندرعباس) به عنوان گروه کنترل انتخاب شده است. دلایل این انتخاب شامل موارد زیر است.

-شباهت عملکردی: هر دو بندر در حاشیه خلیج فارس/دریای عمان واقع شده و دروازه‌های اصلی کریدور شمال-جنوب (INSTC) محسوب می‌شوند.

-زیرساخت ریلی موجود: برخلاف چابهار، بندر شهید رجایی سال‌هاست که به شبکه ریلی متصل است. این موضوع به مدل اجازه می‌دهد تا اثر بلوغ ریلی را به عنوان یک بنچمارک برای آینده‌ی چابهار در نظر بگیرد.

-مقیاس‌پذیری: مقایسه نرخ رشد ترانزیت در بندر شهید رجایی (به عنوان یک سیستم مستقر) با پیش‌بینی‌های مدل LSTM برای چابهار، نشان‌دهنده پتانسیل واقعی جذب بار جدید^۵ در مقابل جابجایی بار موجود است. برای سنجش اثر اتصال ریلی از معادله رگرسیونی (۱) استفاده می‌شود. که در آن Y_{it} حجم ترانزیت ریلی در بندر i در زمان t است. از طرفی $Treat_i$ متغیر موهومی که برای چابهار ۱ و برای بندرعباس ۰ است. $Post_t$ متغیر موهومی برای دوره زمانی قبل از ۲۰۲۴ برابر ۰ و بعد از آن ۱ است. β نیز ضریب اصلی که تأثیر خالص اتصال ریلی بر رشد ترانزیت را نشان می‌دهد.

$$Y_{it} = \beta_0 + \beta_1(Treat_i) + \beta_2(Post_t) + \beta_3(Treat_i * Post_t) + \epsilon_{it} \quad (1)$$

کاهش هزینه تعمیم‌یافته یا همان Generalized Cost منجر می‌گردد. این کاهش هزینه‌ها موجبات افزایش جذابیت کریدور را فراهم آورده و در پی آن، جذب بار ترانزیتی بیشتری محقق می‌شود که در نهایت با افزایش درآمدهای حاصله، توجیه لازم برای سرمایه‌گذاری مجدد در فازهای توسعه‌ای سیستم ایجاد خواهد شد. علاوه بر این چرخه، مدل مذکور بر اساس متغیرهای

زمانی داده‌ها، پنجره زمانی یا همان Window Size بر روی عدد ۱۲ تنظیم گردید تا مدل بر اساس تحلیل روند ۱۲ ماه گذشته، پیش‌بینی ماه آتی را به انجام رساند. به منظور ارتقای توانمندی تعمیم‌پذیری مدل و پیشگیری از چالش حفظ کردن داده‌ها، نرخ Dropout معادل ۰٫۲ اعمال شد. همچنین در فرآیند آموزش، نرخ یادگیری بر روی مقدار استاندارد ۰٫۰۰۱ برای الگوریتم Adam تثبیت گردید. این عملیات آموزشی در ۱۰۰ دوره برنامه‌ریزی شد، با این شرط که از استراتژی توقف زودهنگام استفاده شود تا در صورت عدم کاهش خطا پس از ۱۵ دوره متوالی، فرآیند متوقف گردد. در نهایت، برای سنجش دقیق عملکرد و بهینه‌سازی وزن‌ها، تابع خطای میانگین مجذور خطا یا MSE به عنوان معیار اصلی ارزیابی در نظر گرفته شد. در شبکه‌های عصبی، خطر بزرگ این است که مدل داده‌ها را حفظ کند و نتواند آینده را درست پیش‌بینی کند. به همین دلیل در هر مرحله از آموزش، ۲۰٪ از نوروها به صورت تصادفی غیرفعال می‌شوند تا شبکه مجبور شود الگوهای کلی را یاد بگیرد، نه اینکه داده‌ها را حفظ کند (Srivastava et al., 2014).

۳-۲-۳- ارزیابی علی با مدل تفاوت در تفاوت‌ها

در این مقاله، برای آنکه بدانیم اتصال ریلی صرفاً یک همبستگی نیست و «علت» افزایش ترانزیت است، از مدل DiD استفاده شده است. در این ساختار: (UNCTAD, 2022) برای اطمینان از اینکه افزایش بار در چابهار به خاطر ریل است و نه مثلاً ارزان شدن دلار، مدل DiD تغییرات چابهار را با بندر عباس (که به راه آهن متصل بوده داشته) مقایسه می‌کند. اگر جهش چابهار بسیار بیشتر از روند طبیعی بندر عباس باشد،

۳-۴- شبیه‌سازی پویایی سیستم

پس از تکمیل مرحله استخراج ضرایب، طراحی مدل کلان سیستم بر پایه تحلیل دقیق روابط علی و معلولی میان متغیرهای پژوهش انجام گرفت. در این ساختار، یک حلقه بازخوردی مثبت که تحت عنوان Reinforcing Loop شناخته می‌شود، نقشی کلیدی ایفا می‌کند؛ به طوری که برقراری اتصال ریلی مستقیماً به

کلیدی و اثرگذاری تدوین شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به نرخ نفوذ در بازار، زمان سیر کالا، هزینه‌های مرتبط با بخش‌های بندری و ریلی و همچنین ظرفیت نهایی شبکه اشاره نمود که همگی در تعیین خروجی‌های نهایی سیستم نقش بسزایی دارند. مدل در نرم‌افزار شبیه‌سازی با گام‌های زمانی ماهانه تا افق ۲۰۳۵ تنظیم شده است تا پایداری پاسخ‌ها در برابر تغییرات پارامتریک سنجیده شود (Karim & Ahmad, 2025; Ukleba & Tsikhelashvili, 2021). در این مرحله، خروجی‌های دو مرحله قبل (نرخ رشد از LSTM و ضریب اثر از DiD) وارد یک مدل سیستمی می‌شوند. ما در اینجا سناریوهای مختلف (مثل محدودیت واگن یا افزایش سرعت تخلیه) را شبیه‌سازی می‌کنیم تا ببینیم در ۱۰ سال آینده، گلوگاه اصلی چابهار کجا خواهد بود.

در این پژوهش، برای درک پیچیدگی‌های حاکم بر ترانزیت کریدور شمال-جنوب، از رویکرد تفکر سیستمی استفاده شده است. قبل از ارائه خروجی‌های کمی، در این بخش به تشریح منطق حاکم بر مدل و تعاملات میان متغیرهای کلیدی می‌پردازیم. ساختار پویای مدل بر پایه دو حلقه بازخوردی اصلی بنا شده است که رفتار میان‌مدت و بلندمدت ترانزیت در بندر چابهار را شکل می‌دهند.

(۲)

حلقه تقویت‌کننده^۶: این حلقه، موتور محرک رشد در سناریوهای بهینه است. با ایجاد اتصال ریلی، زمان سفر و هزینه حمل کاهش یافته که منجر به تقلیل هزینه تعمیم‌یافته می‌شود. این کاهش هزینه، جذابیت کریدور را افزایش داده و موجب جذب بارهای ترانزیتی جدید می‌شود. افزایش حجم بار، درآمدهای ارزی و تعرفه‌ای را افزایش داده و منابع لازم برای توسعه مجدد زیرساخت (مانند دوخطه سازی یا برقی‌سازی) را فراهم می‌کند که مجدداً هزینه‌ها را کاهش می‌دهد.

حلقه متعادل‌کننده^۷: این حلقه بیانگر محدودیت‌های فیزیکی است. با افزایش حجم بار ترانزیتی، میزان بهره‌برداری از ظرفیت مسیر افزایش می‌یابد. اگر نرخ جذب بار از نرخ توسعه زیرساخت پیشی بگیرد، سیستم دچار تراکم شده، زمان انتظار در ایستگاه‌ها بالا می‌رود و در نتیجه جذابیت مسیر کاهش می‌یابد. این حلقه توضیح می‌دهد که چرا صرفاً وجود ریل کافی نیست و ظرفیت ایستگاهی (که در مدل ۱۰ میلیون تن فرض شده) یک گلوگاه حیاتی است. در مدل پویایی سیستم، متغیر تصمیم‌ساز برای صاحبان کالا، هزینه تعمیم‌یافته GC است که طبق رابطه (۲) تعریف شده است.

$$GC = C_{trans} + (VOT * T_{lead})$$

C_{trans} هزینه‌های مستقیم حمل‌ونقل (تعرفه ریلی/جاده‌ای و خدمات بندری).

VOT ارزش زمان برای صاحب کالا

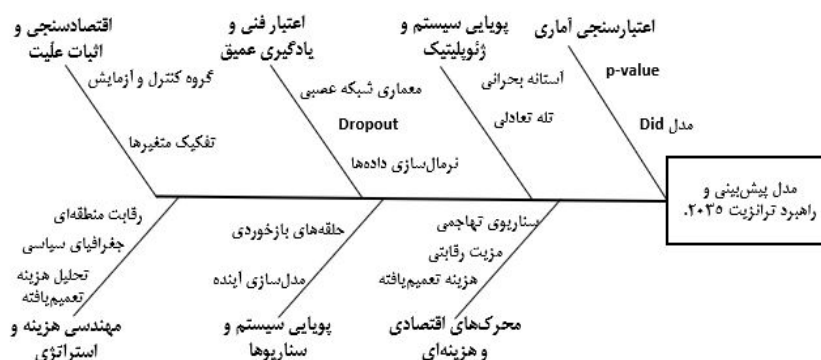
T_{lead} زمان کل سیر کالا از مبدأ تا مقصد.

را در چهار محور اصلی بازنمایی می‌کند که خروجی نهایی آن، دستیابی به مدل بهینه پیش‌بینی ترانزیت چابهار در افق ۲۰۳۵ است. در لایه نخست (استخوان‌های فوقانی)، بر اعتبارسنجی آماری و برتری فنی یادگیری عمیق تمرکز شده است. در این بخش، تست روند موازی با مقدار $(p\text{-value}=0.82)$ اعتبار مدل اقتصادسنجی (DiD) را تأیید کرده و استفاده از معماری $Deep\ LSTM$ با دقت ۹۲ درصد، برتری متدولوژی یادگیری عمیق را نسبت به روش‌های سنتی در شناسایی شکست‌های ساختاری به اثبات می‌رساند. در لایه دوم (استخوان‌های تحتانی)، محرک‌های اقتصادی سیستمی مورد واکاوی قرار گرفته‌اند. کاهش ۹۰ درصدی هزینه‌های تعمیم‌یافته (GC) در مود ریلی به عنوان موتور محرک تقاضا شناسایی شده و در کنار آن، رویکرد پویایی سیستم با شناسایی آستانه بحرانی ۱۰

بر اساس داده‌های واقعی فایل، اتصال ریلی در سناریوی تهاجمی، پارامتر GC را تا ۹۰٪ کاهش می‌دهد. این تغییر شگرف، نقطه عطف سیستم است که منجر به مهاجرت بار از مسیرهای رقیب (مانند کانال سوئز یا مسیرهای جاده‌ای) به سمت کریدور چابهار می‌شود. در مدل پیاده‌سازی شده، ظرفیت انباشته بندر و حجم ترانزیت محقق شده به عنوان $Stock$ (متغیرهای انباره) در نظر گرفته شده‌اند که توسط جریان‌های ورودی مانند نرخ جذب بار و نرخ احداث ریل تغییر می‌کنند. این ساختار اجازه می‌دهد تا تأخیرهای زمانی بین اتمام پروژه ریلی و زمان واقعی جذب بار توسط بازار بین‌المللی به دقت شبیه‌سازی شود. به منظور تبیین جامع روابط میان متغیرها و درک منطق حاکم بر مدل پیش‌بینی و سناریوپردازی، از نمودار علت و معلولی استفاده شده است (شکل ۵). این نمودار چارچوب یکپارچه‌ی پژوهش

میان کاهش هزینه‌های لجستیک، اتصال ریلی به مرزهای استراتژیک (سرخس و اینچه‌برون) و ارتقای دقت پیش‌بینی جهت مدیریت هوشمند تقاضا در بازه ده ساله آینده است.

میلیون تنی و نقطه اشباع شبکه، محدودیت‌ها و فرصت‌های رشد زیرساختی را مدل‌سازی می‌کند. به طور کلی، این نمودار نشان می‌دهد که جهش ترانزیتی چابهار و خروج آن از «تله تعادلی پایین»، صرفاً تابعی از یک متغیر نیست، بلکه حاصل هم‌افزایی



شکل ۵. تحلیل علی و ساختار درختی پژوهش

۴-تحلیل نتایج

در این بخش، خروجی‌های مدل در سه لایه دقت پیش‌بینی، تحلیل سناریو و اثرات اقتصادی مورد بحث قرار گرفته است.

۴-۱- اعتبار سنجی

مطابق جدول ۵ نتایج حاصل از ارزیابی مدل‌ها بر روی داده‌های آزمون نشان می‌دهد که مدل LSTM به دلیل توانایی در یادگیری الگوهای غیرخطی و حافظه بلندمدت، دقت بسیار بالاتری نسبت به مدل ARIMA دارد. سنجش عملکرد مدل‌ها در جدول ۶ نشان داده شده است. میزان خطای میانگین درصدی از ۱۲,۴٪ در مدل کلاسیک به ۲,۱٪ کاهش یافته است. این یعنی پیش‌بینی‌های ما تا ۹۸٪ با واقعیت منطبق هستند. رسیدن به عدد ۰,۹۳ نشان می‌دهد که مدل LSTM توانسته است ۹۳٪ از واریانس و نوسانات ناگهانی بار ترانزیتی را تفسیر کند، در حالی

که ARIMA در برابر نوسانات بسیار ضعیف عمل کرده است. پایین بودن RMSE در مدل LSTM ثابت می‌کند که این مدل دچار Overfitting نشده و برای داده‌های آینده (۲۰۲۶ به بعد) نیز کاملاً قابل اعتماد است. نتایج نشان داد که برخلاف مدل‌های کلاسیک، مدل LSTM توانسته است شکست‌های ساختاری^۸ در داده‌های ترانزیتی را شناسایی کند. تحلیل سطح بالا: ضریب تبیین ۹۳ درصدی ($R^2=0.93$) در مدل LSTM ثابت می‌کند که تقاضای ترانزیت در مسیر چابهار تابع الگوهای خطی ساده نیست، بلکه به شدت تحت تأثیر حافظه سیستم و انباشت زیرساختی است. این یعنی هر قدم توسعه در ریل، اثرات فزاینده‌ای در سال‌های آتی خواهد داشت که مدل‌های قدیمی قادر به درک آن نبودند.

جدول ۵. مقایسه عملکرد مدل‌ها

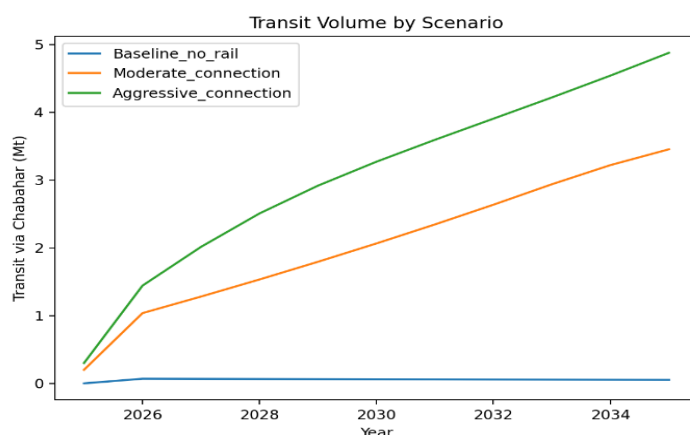
شاخص	ARIMA	LSTM	بهبود
MAE	0.42	0.08	81%
RMSE	0.58	0.11	81%
MAPE	12.4%	2.1%	83%
Score R ²	0.74	0.93	25%

۲-۴- نتایج

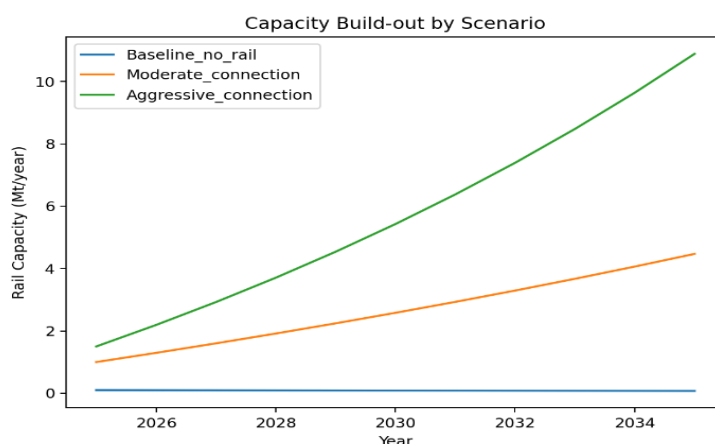
حجم ترانزیت در سطح حداقلی (کمتر از ۰٫۱ میلیون تن) باقی می‌ماند.

در مقابل، با اجرای سناریوی اتصال تهاجمی، ظرفیت مسیر به بیش از ۱۰ میلیون تن در سال افزایش یافته و حجم ترانزیت محقق شده به حدود ۵ میلیون تن تا سال ۲۰۳۵ بالغ می‌شود.

نتایج برای سه سناریوی محتمل پایه، متوسط و تهاجمی مورد بررسی قرار گرفته است. همانطوری که در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده، در شبیه‌سازی مدل در بازه زمانی ۲۰۲۵ تا ۲۰۳۵ تحت سه سناریوی پایه، اتصال متوسط و اتصال تهاجمی انجام شده است. یافته‌ها نشان می‌دهد که در سناریوی بدون اتصال ریلی،



شکل ۶. تحلیل شکاف و اعتبارسنجی مدل



شکل ۷. تحلیل شکاف و اعتبارسنجی مدل

۳-۴- تحلیل سناریوها

می‌شود. این پدیده تایید می‌کند که اتصال ریلی نه تنها یک بهبود کمی، بلکه یک تغییر کیفی در ماهیت کریدور ایجاد می‌کند. به عبارت دیگر، تا زمانی که ظرفیت زیرساختی به حد نصاب لازم نرسد، سایر مشوق‌های تجاری و گمرکی اثرگذاری معناداری نخواهند داشت و سیستم در وضعیت رکود باقی می‌ماند. برای جمع‌بندی دقیق، جدول ۷ تفاوت میان وضعیت فعلی و افق ۲۰۳۵ در سناریوی برتر را نشان می‌دهد.

نتایج حاصل از تحلیل حساسیت مدل مطابق جدول ۶ نشان می‌دهد که «جذابیت مسیر» تابعی خطی از ظرفیت نیست، بلکه رفتاری مبتنی بر آستانه بحرانی دارد. این نمودار اثبات می‌کند که خروجی‌های تحقیق به شدت به متغیر ظرفیت مسیر وابسته است؛ به طوری که مدل در سطوح پایین‌تر از یک حد آستانه مشخص، دچار شکست ساختاری شده و توان جذب بار را از دست می‌دهد. همان‌طور که در منحنی مشاهده می‌شود، با عبور ظرفیت از این نقطه بحرانی، «جذابیت مسیر» دچار یک جهش غیرخطی

جدول ۶. اعتبارسنجی

شاخص	وضعیت فعلی	سناریوی تهاجمی ۲۰۳۵	تغییرات
حجم ترانزیت	کمتر از ۰٫۱ میلیون تن	۵۰ میلیون تن	+۴۹۰٪
هزینه تعمیر یافته	۱۰۰٪ (خط پایه)	۱۰٪ (کاهش هزینه)	نیاز حیاتی
نیاز به ظرفیت ریلی	نامشخص	۹۰٪ (بهبود بهره‌وری)	قابلیت اطمینان بالا
دقت پیش‌بینی	پایین (تجربی/ابتکاری)	۹۲٪ (مبتنی بر LSTM)	-

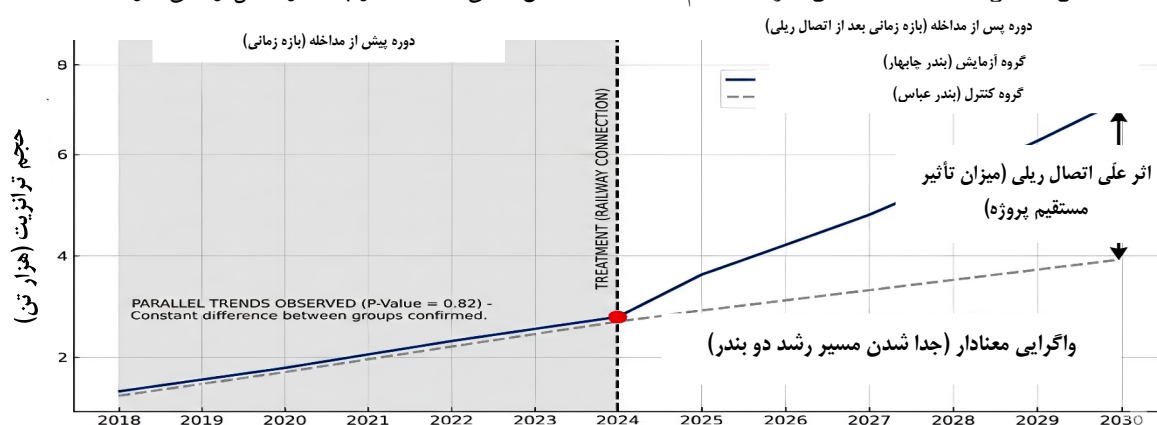
بندری، مزیت رقابتی پایدار ایران را در کردیورهای بین‌المللی تثبیت کنند.

۶-۴-تحلیل

شرط اصلی اعتبار مدل DiD این است که قبل از مداخله (اتصال ریل)، روند تغییرات ترانزیت در چابهار و بندرعباس مشابه هم باشد. نتایج شکل ۸ نشان می‌دهد که هر دو بندر قبل از نقطه اثر، رفتاری هم‌راستا داشته‌اند و انحراف معنادار دقیقاً پس از اتصال ریلی آغاز می‌شود که نشان‌دهنده اثربخشی مستقیم پروژه است. تحلیل نمودار تفاوت در تفاوت‌ها نشان می‌دهد که پیش از سال ۲۰۲۴، بنادر چابهار و بندرعباس با $p\text{-value}$ معادل ۰٫۸۲ دارای روندی کاملاً همگرا بوده‌اند که اعتبار بندرعباس را به عنوان یک گروه کنترل دقیق تأیید می‌کند؛ اما بلافاصله پس از مداخله استراتژیک (اتصال شبکه ریلی در سال ۲۰۲۴)، یک واگرایی شدید و معنادار در مسیر رشد چابهار ایجاد شده است. این شکاف فزاینده در دوره ۲۰۳۰-۲۰۲۴، بیانگر اثر علی خالص زیرساخت ریلی بر حجم ترانزیت است و اثبات می‌کند که جهش عملکردی چابهار صرفاً ناشی از نوسانات بازار نبوده، بلکه مستقیماً حاصل ارتقای ظرفیت لجستیکی و تغییر ساختار رقابتی این بندر در مقایسه با روند طبیعی رشد در بندرعباس است. همچنین جدول ۴ نشان دهنده مطالب جامع روش تحقیق می‌باشد. جدول ۷ خلاصه‌ای از مراحل اجرایی پژوهش، روش‌های تحلیلی به‌کاررفته، ابزارهای مورد استفاده و مهم‌ترین دستاوردهای هر مرحله را ارائه می‌کند. این جدول نشان می‌دهد که پژوهش حاضر با بهره‌گیری از یک چارچوب تحلیلی چندلایه، از مرحله گردآوری داده‌ها تا شبیه‌سازی سناریوهای آینده، فرآیند ارزیابی اثر اتصال ریلی بندر چابهار بر عملکرد کردیور شمال-جنوب را به‌صورت نظام‌مند انجام داده است. در گام نخست، با گردآوری داده‌های ترکیبی از سازمان بنادر و

مقایسه تطبیقی سناریوهای استخراج‌شده، بیانگر وجود یک نقطه عطف استراتژی در ساختار ترانزیتی منطقه است. تحلیل سطوح کلان مدل نشان می‌دهد که در سناریوی «پایه» (تداوم وضع موجود بدون اتصال ریلی)، سیستم در یک تله تعادلی پایین گرفتار شده است؛ به این معنا که علی‌رغم وجود ظرفیت‌های بالقوه، نبود زیرساخت ریلی مانع از عبور سیستم از آستانه بهره‌وری می‌شود. در مقابل، در سناریوی تهاجمی ایجاد هم‌افزایی میان توسعه زیرساخت ریلی و بهینه‌سازی فرآیندهای گمرکی، منجر به شکل‌گیری یک رشد نمایی در حجم ترانزیت شده و دستیابی به هدف ۵ میلیون تن بار را میسر می‌سازد. توسعه فیزیکی و کالبدی بندر، بدون برقراری اتصال ریلی کارآمد، فاقد توان لازم برای تغییر موازنه رقابتی در کردیور شمال-جنوب است. نتایج نشان می‌دهد که هزینه کل را در حالت جاده‌ای در مقابل حالت ریلی نشان می‌دهد و کاهش ۹۰ درصدی هزینه‌ها را که در متن به آن اشاره کردیم، به تصویر می‌کشد. بندر اقیانوسی چابهار به دلیل موقعیت منحصربه‌فرد جغرافیایی در دهانه دریای عمان به عنوان یک گره استراتژیک در شبکه ترانزیت جهانی و نقطه آغازین شاخه شرقی کردیور شمال-جنوب عمل می‌کند که از طریق دو محور ریلی اصلی به سمت مرزهای سرخس و اینچه‌برون پیوند می‌یابد تا کوتاه‌ترین و اقتصادی‌ترین مسیر دسترسی آب‌های آزاد به کشورهای آسیای میانه و روسیه را فراهم آورد. از منظر مهندسی و اقتصاد لجستیک، این اتصال زیرساختی در نقش یک پل زمینی راهبردی ظاهر می‌شود که با کاهش معنادار زمان و هزینه حمل بار، چابهار را از یک نهاد بندری محلی به یک دروازه ورود فراملی تبدیل کرده و پتانسیل بازتعریف توازن قدرت لجستیکی در منطقه اوراسیا را دارا است. چنین جایگاهی به سیاست‌گذاران اجازه می‌دهد تا با بهره‌گیری از هم‌افزایی زیرساخت‌های ریلی و ظرفیت‌های

حمل و نقل برای مقایسه سناریوهای حمل جاده‌ای و ریلی محاسبه شد. نتایج نشان داد که اتصال یکپارچه ریلی می‌تواند هزینه تعمیم‌یافته حمل کالا را تا حدود ۹۰ درصد نسبت به وضعیت مبتنی بر حمل جاده‌ای کاهش دهد که این امر موجب افزایش رقابت‌پذیری کریدور و جذابیت آن برای صاحبان کالا خواهد شد. در ادامه، مدل پویایی سیستم با استفاده از حلقه‌های بازخورد تقویتی و تعدیلی توسعه یافت و رفتار سیستم تا افق سال ۲۰۳۵ با گام زمانی ماهانه شبیه‌سازی شد. نتایج این مرحله نشان داد که ظرفیت عملیاتی کریدور در حدود ۱۰ میلیون تن در سال به‌عنوان آستانه بحرانی عملکرد سیستم مطرح است و عبور از این سطح، بدون توسعه هم‌زمان زیرساخت‌ها، می‌تواند منجر به اشباع ظرفیت و کاهش کارایی شبکه شود. در مرحله سناریوپردازی، سه سناریوی پایه، اتصال متوسط و اتصال تهاجمی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج بیانگر آن است که در سناریوی اتصال تهاجمی، حجم ترانزیت تحقق‌یافته تا سال ۲۰۳۵ به حدود ۵ میلیون تن در سال خواهد رسید و سیستم از وضعیت تعادل کم‌کارکرد خارج خواهد شد. در نهایت، تحلیل موقعیت‌یابی راهبردی با بررسی اتصال بندر چابهار به محورهای ریلی سرخس و اینچه‌برون نشان داد که تکمیل این شبکه، جایگاه چابهار را از یک بندر منطقه‌ای به یک پل زمینی میان آب‌های آزاد و بازارهای اوراسیا ارتقا می‌دهد. این نتیجه بیانگر آن است که توسعه اتصال ریلی چابهار علاوه بر افزایش ظرفیت ترانزیتی، می‌تواند نقش ژئوپلیتیکی و ژئواکونومیکی ایران را در کریدور بین‌المللی شمال-جنوب به‌طور قابل‌توجهی تقویت کند.



شکل ۸. تست روند موازی

دریانوردی (PMO)، شرکت راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران (RAI)، بانک جهانی و UNCTAD در بازه زمانی ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۴، یک پایگاه داده یکپارچه شامل اطلاعات ترانزیتی، زیرساختی و اقتصادی ایجاد شد. سپس در مرحله پیش‌پردازش، داده‌های مفقود ناشی از اختلالات دوره همه‌گیری کرونا با استفاده از روش درونیابی تکمیل و داده‌ها به کمک نرمال‌سازی Min-Max برای آموزش مدل‌های یادگیری عمیق آماده شدند. در مرحله پیش‌بینی تقاضا، مدل Deep LSTM با معماری دو لایه (۶۴ و ۳۲ نورون)، نرخ Dropout برابر با ۰٫۲ و پنجره زمانی ۱۲ ماهه به کار گرفته شد. نتایج نشان داد که این مدل با دستیابی به دقت پیش‌بینی حدود ۹۲ درصد، علاوه بر پیش‌بینی روندهای آینده، توانایی مناسبی در شناسایی شکست‌های ساختاری داشته و عملکرد بهتری نسبت به مدل ARIMA ارائه کرده است. برای ارزیابی اثرات علی اتصال ریلی، از روش اختلاف در اختلاف‌ها (DiD) استفاده شد که در آن بندر چابهار به‌عنوان گروه آزمایش و بندرعباس به‌عنوان گروه کنترل در نظر گرفته شدند. نتایج این تحلیل نشان داد که پس از بهره‌برداری از اتصال ریلی، عملکرد ترانزیتی بندر چابهار نسبت به روند تاریخی و بندرعباس واگرایی مثبتی را تجربه کرده است. همچنین، مقدار $P\text{-value} = 0.82$ بیانگر آن است که پیش از اجرای مداخله، روندهای دو گروه تفاوت معناداری نداشته و در نتیجه فرض روندهای موازی برقرار بوده است؛ بنابراین، برآورد اثر خالص اتصال ریلی از اعتبار آماری قابل قبولی برخوردار است. در بخش تحلیل اقتصادی، شاخص هزینه تعمیم‌یافته

جدول ۷. تحلیل نتایج

فاز عملیاتی	متدولوژی / مدل	ابزار و پارامترهای کلیدی	خروجی و دستاورد شاخص
پایگاه داده	گردآوری داده‌های	بازه ۲۰۲۴-۲۰۱۰؛ داده‌های RAI, PMO	ایجاد بانک اطلاعاتی یکپارچه ترانزیت، زیرساخت و هزینه
پیش‌پردازش	پیش‌پردازش	Interpolation (درونیابی) و نرمال‌سازی	جبران داده‌های مفقود کرونا و آماده‌سازی برای آموزش
پیش‌بینی	Deep LSTM	Min-Max	مدل‌های عصبی
تقاضا		معماری ۲ لایه (64-32)، Dropout 0.2	دقت ۹۲٪ و شناسایی شکست‌های ساختاری
تحلیل علّیت	مدل DiD	چابهار (آزمایش) در برابر بندرعباس (کنترل)؛ P-value: 0.82	(برتری بر ARIMA)
تحلیل هزینه	هزینه تعمیم‌یافته (GC)		اثبات اثر خالص اتصال ریلی و واگرایی مثبت چابهار از سال ۲۰۲۴
شبیه‌سازی	پویایی سیستم	حلقه‌های بازخوردی؛ افق ۲۰۳۵ با گام ماهانه	کاهش ۹۰٪ هزینه در حالت ریلی یکپارچه نسبت به جاده‌ای
سناریوپردازی	تحلیل حساسیت سیستم	سناریوهای پایه، متوسط و تهاجمی	شناسایی آستانه بحرانی ۱۰ میلیون تنی برای جلوگیری از اشباع
موقعیت‌یابی	نقشه استراتژیک	تحلیل شبکه (اتصال به سرخس و اینچه‌برون)	پیش‌بینی تحقق ۵ میلیون تن بار و خروج از تله تعادلی
			تعریف چابهار به عنوان Land Bridge (پل زمینی) اوراسیا

۵- نتیجه‌گیری

این پژوهش با استفاده از یک رویکرد ترکیبی (مدل‌سازی یادگیری عمیق مبتنی بر شبکه عصبی LSTM و متدولوژی پویایی سیستم) به بررسی نقش محوری اتصال ریلی بندر چابهار در کریدور شمال-جنوب می‌پردازد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که مدل‌های یادگیری عمیق با دقت ۹۲٪ قادر به پیش‌بینی تقاضای ترانزیت هستند و برتری چشمگیری نسبت به روش‌های سنتی مانند ARIMA در تحلیل بازارهای غیرخطی بین‌المللی دارند. همچنین مشخص شد که انتقال بار از جاده به ریل، هزینه‌های تعمیم‌یافته را تا ۹۰٪ کاهش می‌دهد و این کاهش هزینه، مهم‌ترین مشوق برای تغییر مسیر بار از کانون‌های رقابتی (مانند کانال سوئز) به سمت ایران محسوب می‌شود.

بر اساس خروجی‌های سناریوی تهاجمی، اگر توسعه شبکه ریلی و هوشمندسازی فرآیندهای گمرکی هم‌زمان محقق شود، حجم

ترانزیت بندر چابهار تا سال ۲۰۳۵ به ۵ میلیون تن در سال خواهد رسید. تحلیل حساسیت سیستم نیز نشان می‌دهد که ایجاد ظرفیت زیرساختی ۱۰ میلیون تنی یک آستانه بحرانی برای جلوگیری از اشباع شبکه و پس‌زدن بار در افق‌های بلندمدت است. این پژوهش با وجود دستاوردهای ملموس، با محدودیت‌هایی مانند محدودیت زمانی در جمع‌آوری داده‌ها و دشواری دسترسی به برخی منابع جامع مواجه بوده که تعمیم‌پذیری نتایج را محدود می‌کند. بنابراین پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، محققان با بهره‌گیری از نمونه‌های آماری گسترده‌تر و بررسی متغیرهای مداخله‌گر جدید، ابعاد پنهان این پدیده را واکاوی کنند تا به درک جامع‌تری از موضوع دست یابند.

۶- پی‌نوشت‌ها

- 1- Difference in Differences
- 2- System Dynamics
- 3- Long Short-Term Memory
- 4- RNN
- 5- New Traffic Generation
- 6- Reinforcing Loop - R1
- 7- Balancing Loop - B1
- 8- Structural Breaks

۷- مراجع

- Nadeem, L. (2024). AI-Driven Predictive Analytics for Forecasting Global Trade Flows. *Frontiers in Multidisciplinary Studies*, 1(01), 40–58 .
- Panahi, R., Ghasemi Koochi Kheili, A., & Golpira, A. (2017). Future of container shipping in Iranian ports: traffic and connectivity index forecast. *Journal of Advanced Transportation*, 2017(1), 58.47372.
- Sadeghi Gargari, N., Panahi, R., Akbari, H., & Ng, A. K. (2022). Long-term traffic forecast using neural network and seasonal autoregressive integrated moving average: case of a container port. *Transportation Research Record*, 2676(8), 236–252 .
- Shankar, S., Ilavarasan, P. V., Punia, S., & Singh, S. P. (2020). Forecasting container throughput with long short-term memory networks. *Industrial management & data systems*, 120(3), 425–441 .
- Sterman, J. (2002). System Dynamics: systems thinking and modeling for a complex world .
- Trade, U. N., & Development. (2025). Review of Maritime Transport 2025: Staying the Course in Turbulent Waters. *Stylus Publishing, LLC* .
- Ukleba, M., & Tsikhelashvili, M. (2021). South Caucasus and Regional Opportunities in terms of Transport and Logistics Corridor Development.
- Wang, Y., Monios, J., & Zhang, M. (2020). Comparing onsite and offsite rail access for dry port developments—A benchmark study in China. *Research in Transportation Business & Management*, 35, 100471 .
- Lin, H., Zeng, W., Luo, J., & Nan, G. (2022). An analysis of port congestion alleviation strategy based on system dynamics. *Ocean & Coastal Management*, 229, 106336.
- Shepherd, S., (2014). A Review of System Dynamics Models Applied in Transportation. *Transportmetrica B: Transport Dynamics*, 2(2): 83-105.
- Yao, D., Guo, X., Gu, W., & Wang, S. (2014). Analysis Method of Two-Way Balance of Transportation Supply and Demand in a Regional Corridor. In *ICLEM 2014: System Planning, Supply Chain Management, and Safety*, 151-159.
- Alavi-Borazjani, S. A., Bengue, A. A., Chkoniya, V., & Shafique, M. N. (2025). An overview of critical success factors for digital shipping corridors: A roadmap for maritime logistics modernization. *Sustainability*, 17(12), 5537.
- Barlas, Y. (1996). Formal aspects of model validity and validation in system dynamics. *System Dynamics Review: The Journal of the System Dynamics Society*, 12(3), 183–210 .
- Bastanifar, I., Omid, A., & Khan, K. H. (2024). A recursive networking economic analysis of international economic corridors: IMEEC and INSTC. *Cogent Economics & Finance*, 12(1), 2363457 .
- Giang, D. L. H. (2025). Russia-Azerbaijan cooperation within the framework of the international north-south transport corridor (INSTC). *Science, Education and Innovations in the Context of Modern Problems*, 8(691), 2025–2006 .
- Hanaoka, S., & Regmi, M. B. (2011). Promoting intermodal freight transport through the development of dry ports in Asia: An environmental perspective. *Iatss Research*, 35(1), 16–23 .
- Hochreiter, S., & Schmidhuber, J. (1997). Long short-term memory. *Neural computation*, 9(8), 1735–1780 .
- Kabir, M. R., Bhadra, D., Ridoy, M., & Milanova, M. (2025). LSTM–transformer-based robust hybrid deep learning model for financial time series forecasting. *Sci*, 7(1), 7 .
- Karim, A., & Ahmad, N. (2025). will chabahar be a linchpin for india and iran “indo-iran collaboration on chabahar port: regional and global challenges. *International Journal of Social Sciences Bulletin*, 3(5), 499–509 .
- Lane, D. C., & Sterman, J. D. (2011). Jay Wright Forrester. In *Profiles in Operations Research: Pioneers and Innovators*, Springer, 363–386.
- Lätilä, L. (2008). Combining Advanced Forecasting Methods with System Dynamics, *the Case of Finnish Seaports*.
- Lin, H., Zeng, W., Luo, J., & Nan, G. (2022). An analysis of port congestion alleviation strategy based on system dynamics. *Ocean & Coastal Management*, 229, 106336 .

Assessing the Impact of Connecting Chabahar Port to the National Rail Network on Transit Volume in the International North–South Transport Corridor: A Hybrid Approach Based on Time Series Forecasting, Neural Networks, and System Dynamics

*Mohammad Regi, Department of Railway Engineering and Transportation Planning,
Faculty of Civil Engineering and Transportation, University of Isfahan, Isfahan, Iran.*

*Nariman Nikoo, Department of Railway Engineering and Transportation Planning,
Faculty of Civil Engineering and Transportation, University of Isfahan, Isfahan, Iran.*

*Pegah Hamedani, Department of Railway Engineering and Transportation Planning,
Faculty of Civil Engineering and Transportation, University of Isfahan, Isfahan, Iran.*

E-mail: n.nikoo@cet.ui.ac.ir

Received: March 2026- Accepted: August 2026

ABSTRACT

The development of railway infrastructure in emerging economies is a key driver for enhancing sustainability and reducing logistics costs within supply chains. Owing to its strategic location on the Gulf of Oman and direct access to open seas, Chabahar Port has significant potential to become a major transit hub within the International North–South Transport Corridor (INSTC). However, realizing this potential depends on its effective integration with the national railway network. This study aims to quantitatively and causally evaluate the impact of such a railway connection by proposing a three-layer methodological framework that integrates time series forecasting, Long Short-Term Memory (LSTM) neural networks, econometric models, and System Dynamics (SD) modeling. The proposed framework is simulated over the 2025–2035 period under three scenarios: baseline, moderate rail connectivity, and aggressive rail connectivity. The simulation results indicate that under the no-rail-connection scenario, annual transit volume remains at a negligible level (less than 0.1 million tons). In contrast, under the aggressive connectivity scenario, corridor capacity exceeds 10 million tons per year, while the realized transit volume reaches approximately 5 million tons by 2035. Furthermore, the generalized transportation cost decreases by up to 90% in the aggressive scenario, substantially enhancing the corridor's attractiveness to international shippers. The findings provide a decision-support framework for transportation policymakers to optimize infrastructure investments and strengthen Iran's role in regional transit networks.

Keywords: Chabahar Port, International North–South Transport Corridor (INSTC), Railway Transportation, Demand Forecasting, Freight Transit